

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai pengelasan SMAW telah banyak dilakukan untuk menganalisis pengaruh parameter dan teknik pengelasan terhadap kualitas hasil las. Studi yang dipublikasikan oleh IJETA dalam artikel "*A Comparative Study Between Oxy-Acetylene and SMAW of AISI 5160 Steel*" menunjukkan bahwa pengelasan SMAW pada baja AISI 5160 menghasilkan kekuatan tarik yang baik, namun masih ditemukan cacat berupa porositas akibat gas yang terjebak selama proses pembekuan logam las (Jilabi, 2024).

Selanjutnya, penelitian oleh Universitas Negeri Surabaya dalam artikel "Pengaruh Variasi Arus dan Diameter Elektroda SMAW Posisi 1G pada Baja ST 42" menyatakan bahwa variasi arus dan elektroda sangat mempengaruhi jumlah porositas yang terbentuk (Wahyu and Mochammad, 2025).

Penelitian lain oleh Universitas Muhammadiyah Jakarta melalui artikel "Pengaruh Porositas terhadap Kekuatan Tarik pada Pengelasan Baja AISI 1050" menjelaskan bahwa keberadaan porositas dapat menurunkan kekuatan mekanik sambungan las secara signifikan.

Lebih lanjut, studi yang diterbitkan oleh MDPI dalam artikel "*Effect of Welding Parameters on Porosity Formation in Arc Welding*" menyatakan bahwa teknik gerakan elektroda, termasuk ayunan, mempengaruhi pelepasan gas dalam logam cair sehingga berkontribusi terhadap terbentuknya porositas. Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa parameter dan teknik pengelasan, khususnya variasi ayunan elektroda pada posisi 1G, memiliki pengaruh penting terhadap porositas dan penetrasi, sehingga

perlu dilakukan penelitian lebih lanjut pada material AISI 5160.

2.2 Pengertian Pengelasan

Pengelasan merupakan proses penyambungan dua atau lebih material logam melalui pencairan sebagian logam induk dan/atau logam pengisi, dengan atau tanpa tekanan, sehingga terbentuk ikatan metalurgi yang bersifat permanen. Proses ini banyak diterapkan dalam berbagai sektor industri seperti konstruksi, perkapalan, otomotif, manufaktur, dan industri berat karena mampu menghasilkan sambungan yang kuat dan efisien (Konsuci, Rosidah and Erifive, 2024)

Berdasarkan standar internasional yang ditetapkan oleh *American Welding Society* (AWS), pengelasan didefinisikan sebagai proses penyambungan material yang menghasilkan koalesensi melalui pemanasan hingga mencapai suhu lebur, baik dengan atau tanpa tekanan serta dengan atau tanpa penggunaan logam pengisi (Mikraj, 2024). Secara umum, proses pengelasan dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, yaitu:

- *Fusion Welding*, yaitu metode pengelasan yang memanfaatkan panas untuk mencairkan logam dasar, dengan atau tanpa bahan pengisi.
- *Pressure Welding*, yaitu metode yang menggunakan tekanan dan/atau gesekan tanpa penambahan bahan pengisi, sehingga menghasilkan deformasi yang relatif kecil. Beberapa metode yang termasuk dalam kedua kategori tersebut antara lain pengelasan busur listrik, pengelasan gas, dan *resistance welding* (Melalui and Penetran, 2021)



Gambar 2. 1 Pengelasan SMAW

Sumber : <https://id.wikipedia.org/wiki/Las>

2.3 Pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*)

Pengelasan (*welding*) merupakan proses penyambungan dua atau lebih logam dengan cara mencairkan material dasar dan logam pengisi, sehingga setelah mengalami pendinginan akan terbentuk sambungan yang kuat. Salah satu metode pengelasan yang digunakan adalah *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) atau las busur listrik terlindung secara manual. Metode SMAW menggunakan elektroda berinti logam yang dilapisi fluks sebagai pelindung dari pengaruh atmosfer. Saat busur listrik terbentuk antara elektroda dan benda kerja, logam induk dan logam pengisi akan mencair dan berkumpul pada daerah sambungan. Lapisan fluks pada elektroda menghasilkan gas pelindung yang berfungsi mengurangi oksidasi dan kontaminasi pada kolam las, sehingga kualitas sambungan dapat meningkat (Andika Ferdi Arfiansyah, 2023).

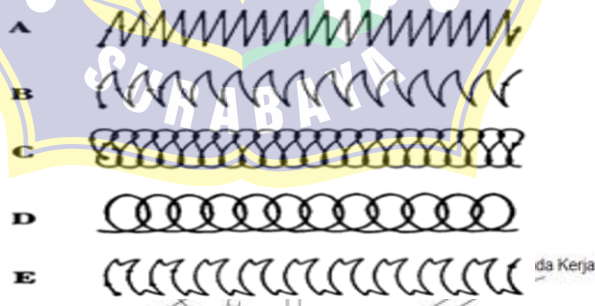
Dalam proses SMAW, terdapat beberapa parameter penting yang memengaruhi hasil pengelasan, antara lain arus

listrik, tegangan, kecepatan pengelasan, diameter dan jenis elektroda, serta teknik ayunan elektroda yang diterapkan oleh operator. Pemilihan parameter dan teknik yang tepat akan memberikan pengaruh signifikan terhadap bentuk geometris sambungan serta potensi munculnya cacat las (Manik, Chrismiando and Prayoga, 2023).

Panas pada proses SMAW dihasilkan dari busur listrik yang terjadi antara ujung elektroda terbungkus dengan logam induk. Elektroda yang digunakan memiliki lapisan fluks dengan beberapa fungsi utama, yaitu:

1. Menghasilkan gas pelindung untuk melindungi logam cair dari kontaminasi udara.
2. Membentuk terak (*slag*) yang melindungi logam las selama proses pendinginan.
3. Menjaga kestabilan busur listrik selama proses pengelasan.

Keunggulan metode SMAW antara lain peralatannya yang sederhana, fleksibel dalam penggunaan, serta dapat diaplikasikan pada berbagai posisi pengelasan. Namun demikian, kualitas hasil pengelasan sangat dipengaruhi oleh keterampilan dan pengalaman operator



Gambar 2. 2 Variasi Ayunan Elektroda



Gambar 2. 3 Pengelasan SMAW

Sumber : <https://smk10semarang.sch.id/>

2.4 Elektroda

Selama proses pengelasan berlangsung, logam las berada dalam kondisi cair sehingga sangat rentan bereaksi dengan udara di sekitarnya. Gas-gas seperti oksigen dan nitrogen dapat berinteraksi dengan logam cair dan memicu reaksi oksidasi. Reaksi ini berpotensi menurunkan kualitas hasil pengelasan, yang ditandai dengan terbentuknya rongga-rongga udara (porositas) atau sambungan yang menjadi keropos (Yasinta, Wibowo and Saputro, 2025)

Elektroda merupakan komponen yang berfungsi sebagai penghantar arus listrik untuk menghasilkan busur listrik antara ujung elektroda dan logam induk dalam proses pengelasan. Pada metode *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW), elektroda bersifat habis pakai (*consumable*), yaitu selain berfungsi sebagai penghantar arus, elektroda juga mencair dan berperan sebagai logam pengisi (*filler metal*) dalam pembentukan sambungan las (Rinanto, Putra and Utama, 2024).

2.4.1 Elektroda SMAW terdiri dari dua bagian utama:

1. Inti kawat (*core wire*)
Berfungsi sebagai logam pengisi yang mencair dan membentuk logam las. Komposisi kimia inti kawat biasanya disesuaikan dengan material yang akan dilas agar memiliki sifat mekanik yang kompatibel.
2. Lapisan fluks (*flux coating*)
Lapisan pelindung yang menyelimuti inti kawat dan memiliki fungsi penting dalam proses pengelasan.

Tabel 2. 1 Klasifikasi Elektroda

Parameter	Spesifikasi
Kode Elektroda	E6013
Standar	AWS A5.1 / ASME SFA-5.1
Jenis Proses	SMAW (Shielded Metal Arc Welding)
Jenis Selaput (Flux)	Rutile (Titania)
Material yang Dilas	Baja karbon

Posisi Pengelasan	Semua posisi (Flat, Horizontal, Vertical, Overhead)
Arus Las	AC, DC+, dan DC-
Kekuatan Tarik Minimum	60.000 psi ($\pm$ 413 MPa)
Jenis Penetrasi	Sedang hingga dangkal
Karakteristik Busur	Halus, stabil, mudah dinyalakan kembali
Pelepasan Terak (Slag)	Mudah dilepas (self-detaching)
Aplikasi	Fabrikasi umum, konstruksi ringan, perbaikan, pekerjaan pelat tipis

2.4.2 Klasifikasi Elektroda

Klasifikasi elektroda SMAW umumnya mengacu pada standar dari *American Welding Society* (AWS). Sistem penamaan elektroda menggunakan kode seperti:

E6013

Penjelasan kode:

- E : Electrode
- 60 : Kekuatan tarik minimum 60.000 psi atau sama dengan 414 MPa
- 1 : Posisi pengelasan (1 = semua posisi)
- 3 : Jenis lapisan fluks dan jenis arus yang digunakan

Sebagai contoh, elektroda E6013 merupakan elektroda dengan lapisan rutil yang menghasilkan busur stabil, penetrasi sedang, dan cocok untuk baja karbon rendah (Martdiansyah and Lubis, 2025)

2.5 Besar Arus Listrik

Besarnya arus listrik dalam proses pengelasan harus disesuaikan dengan beberapa faktor, seperti diameter elektroda, ketebalan dan jenis material yang dilas, tipe elektroda, jenis sambungan, diameter inti elektroda, serta posisi pengelasan. Pada daerah pengelasan yang memiliki kapasitas panas tinggi, diperlukan arus yang lebih besar agar proses pencairan dapat berlangsung dengan baik.

Arus pengelasan merupakan parameter penting yang secara langsung memengaruhi kedalaman penetrasi dan laju pencairan logam induk. Semakin besar arus yang digunakan, maka semakin dalam penetrasi dan semakin cepat proses pencairan yang terjadi.

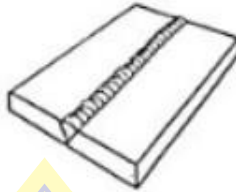
Namun demikian, pemilihan arus harus dilakukan secara tepat. Arus yang terlalu rendah akan menyebabkan ujung elektroda sulit mencair dan busur listrik menjadi tidak stabil. Selain itu, panas yang dihasilkan tidak cukup untuk melelehkan logam dasar sehingga menghasilkan manik las yang kecil, tidak merata, serta penetrasi yang dangkal. Sebaliknya, arus yang terlalu tinggi dapat menyebabkan lelehan logam menjadi terlalu lebar, meningkatkan percikan (*spatter*), menghasilkan penetrasi yang berlebihan, serta memperbesar penguatan logam las.

2.6 Posisi Pengelasan 1G

Posisi pengelasan merupakan penentuan orientasi benda kerja serta arah pelaksanaan proses pengelasan. Posisi 1G (*flat position*) adalah kondisi di mana benda kerja berada pada posisi datar dan proses pengelasan dilakukan dari bagian atas permukaan (Waranugraha, Murjito and Mulyono, 2025)

Pada posisi 1G, logam cair relatif lebih stabil akibat pengaruh gaya gravitasi, sehingga posisi ini dianggap paling mudah dibandingkan dengan posisi *horizontal*, *vertikal*, maupun *overhead*. Meskipun demikian, kualitas hasil pengelasan tetap dipengaruhi oleh berbagai parameter, seperti pengaturan arus, tegangan, serta keterampilan operator, termasuk dalam penerapan teknik ayunan elektroda.

posisi flat
1G



Gambar 2. 4 Posisi Pengelasan 1G

Sumber : <https://hasspesialis.co.id/>

2.7 Teknik Ayunan Elektroda

Teknik ayunan elektroda merupakan pola pergerakan elektroda selama proses pengelasan berlangsung. Teknik ini bertujuan untuk mengendalikan distribusi panas, lebar manik las, serta kedalaman penetrasi.

Beberapa variasi teknik ayunan yang umum digunakan dalam proses SMAW antara lain:

1. Lurus

Elektroda digerakkan secara lurus mengikuti garis sambungan tanpa gerakan ke samping. Teknik ini menghasilkan penetrasi yang relatif dalam dengan manik las yang sempit.

2. Zig-zag

Elektroda digerakkan secara bolak-balik ke kiri dan kanan membentuk pola zig-zag. Teknik ini menghasilkan manik las yang lebih lebar serta distribusi panas yang lebih merata.

3. Setengah lingkaran (*circular weave*)

Elektroda digerakkan dengan pola setengah lingkaran. Teknik ini umumnya digunakan untuk memperlebar manik las sekaligus mengontrol pencairan pada sisi kampuh.

Variasi teknik ayunan elektroda tersebut dapat memengaruhi besarnya masukan panas (*heat input*), lama waktu logam cair berada dalam kondisi cair, serta proses pembekuan. Hal ini pada akhirnya berdampak pada tingkat porositas dan kedalaman penetrasi hasil pengelasan.

2.8 Plat Baja AISI 5160

Plat baja AISI 5160 adalah baja pegas paduan kromium karbon tinggi yang terkenal karena ketangguhan luar biasa, keuletan tinggi, dan ketahanan lelah yang baik. Material ini, yang juga dikenal sebagai baja pegas 5160, sering digunakan untuk aplikasi tugas berat seperti pegas daun/koil otomotif, alat berat, dan bilah pisau.

Berikut adalah detail mengenai AISI 5160:

- Sinonim: Sering disebut sebagai baja pegas 5160, AISI/SAE 5160, atau baja paduan kromium karbon tinggi.
- Karakteristik Utama: Ketangguhan tinggi, daktilitas baik, tahan lelah (*fatigue resistance*), dan kemampuan pengerasan yang baik.

Baja AISI 5160 memiliki risiko retak yang relatif kecil akibat proses pendinginan yang cepat. Meskipun demikian, cacat pengelasan seperti porositas masih dapat terjadi apabila teknik pengelasan yang digunakan tidak sesuai.



Gambar 2. 5 Plat Baja AISI 5160

Sumber : <https://hardajaya.com/plat-besi>

Tabel 2. 2 Spesifikasi Baja

Sifat Mekanik	Nilai
---------------	-------

Nama Material	Baja AISI 5160
Standar	AISI/SAE 5160
Jenis Baja	Baja paduan pegas (Spring Steel)
Klasifikasi	Baja karbon
Kandungan Karbon	0,56–0,64 %
Kandungan Kromium (Cr)	0,70–0,90 %
Kandungan Mangan (Mn)	0,75–1,00 %
Kandungan Silikon (Si)	0,15–0,35 %
Kandungan Fosfor (P)	Maksimum 0,035 %
Kandungan Sulfur (S)	Maksimum 0,040 %
Massa Jenis	7,85 g/cm ³
Modulus Elastisitas	±200 GPa
Modulus Geser	±80 GPa
Rasio Poisson	0,27–0,30
Titik Leleh	±1.420–1.460 °C
Konduktivitas Termal	±46 W/m·K
Koefisien Muai Panjang	±11,8 × 10 ⁻⁶ /°C

2.9 Cacat Las Porositas

Porositas merupakan salah satu jenis cacat pada hasil pengelasan yang ditandai dengan terbentuknya rongga-rongga kecil akibat gas yang terjebak di dalam logam las selama proses pembekuan. Gas tersebut dapat berasal dari beberapa faktor, antara lain:

1. Kandungan kelembapan pada elektroda
2. Adanya kontaminasi pada permukaan logam
3. Ketidakstabilan busur listrik selama proses pengelasan
4. Penerapan teknik pengelasan yang kurang tepat

Keberadaan porositas dapat menurunkan kekuatan sambungan las karena mengurangi luas penampang efektif serta menjadi titik konsentrasi tegangan. Oleh sebab itu, pengendalian parameter dan teknik pengelasan sangat diperlukan untuk meminimalkan terjadinya cacat tersebut.

Rumus Porositas Las SMAW

Porositas las adalah cacat berupa rongga udara atau gas yang terjebak pada logam las. Pada pengujian hasil las SMAW, porositas biasanya dihitung berdasarkan luas cacat terhadap luas total daerah pengamatan.

1. Rumus Persentase Porositas

$$\text{Porositas}(\%) = \frac{A_p}{A_t} \times 100\%$$

Keterangan:

- A_p = luas total pori/cacat (mm^2)
- A_t = luas total area pengamatan las (mm^2)

2. Menentukan Luas Area Pengamatan

Jika area pengamatan berbentuk persegi panjang:

$$A_t = p \times l$$

Keterangan:

- p = panjang area pengamatan (mm)
- l = lebar area pengamatan (mm)

3. Menghitung Luas Total Pori

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

Keterangan:

- A = luas pori
- r = jari-jari pori
- d = diameter pori
- $\pi \approx 3,14$

2.10 Penetrasi Las

Penetrasi merupakan kedalaman logam las yang mencair dan masuk ke dalam logam induk selama proses pengelasan. Penetrasi yang optimal akan menghasilkan ikatan metalurgi yang kuat antara logam las dan logam dasar (Witono *et al.*, 2025)

Beberapa faktor yang memengaruhi tingkat penetrasi antara lain:

- Besarnya arus pengelasan
- Tegangan listrik

- Kecepatan pengelasan
- Diameter elektroda
- Teknik ayunan elektroda

Teknik pengelasan dengan pola lurus (*stringer*) umumnya menghasilkan penetrasi yang lebih dalam dibandingkan teknik ayunan lebar (*weaving*), karena panas yang dihasilkan lebih terfokus pada satu titik.

2.10.1 Liquid Penetrant Test

Prinsip kerja *Liquid Penetrant Test* (LPT) dilakukan dengan mengaplikasikan cairan penetrant berwarna kontras pada permukaan material yang akan diuji. Cairan penetrant harus memiliki kemampuan penetrasi yang tinggi serta viskositas yang rendah agar dapat meresap ke dalam cacat permukaan. Setelah waktu penetrasi tertentu, sisa cairan pada permukaan dibersihkan. Indikasi adanya cacat akan terlihat dari perbedaan warna yang mencolok antara penetrant yang tertahan di dalam cacat dan permukaan material. Selanjutnya, cairan developer digunakan untuk menarik keluar penetrant dari dalam cacat sehingga indikasi cacat menjadi lebih jelas terlihat (Wibisono Galih *et al.*, 2024)

Dalam proses Liquid Penetrant Test, terdapat beberapa bahan utama yang digunakan, yaitu:

1. *Cleaner*

Merupakan cairan pembersih yang digunakan untuk membersihkan permukaan material sebelum dan setelah proses inspeksi.

2. *Penetrant*

Berfungsi untuk mendeteksi dan mengidentifikasi cacat pada permukaan benda uji. Jenis yang digunakan adalah penetrant berwarna merah (*red visible dye penetrant*) dengan tipe *solvent removable* untuk memudahkan proses pembersihan.

3. *Developer*

Berfungsi untuk menarik cairan penetrant yang terperangkap di dalam cacat ke permukaan, sehingga indikasi cacat dapat terlihat dengan lebih jelas.



Gambar 2. 6 Liquid Penetrant Test
Sumber : Album Pribadi

1. Rumus Penetrasi Las

$$P=h$$

Keterangan:

P = kedalaman penetrasi las (mm)

h = tinggi/kedalaman penetrasi yang diukur pada foto makro

2. Rumus Penetrasi Relatif (%)

Jika ingin mengetahui persentase penetrasi terhadap tebal plat:

$$\text{Penetrasi}(\%) = \frac{p}{t} \times 100\%$$

Keterangan:

P = kedalaman penetrasi (mm)

t = tebal plat (mm)

2.11 Hubungan Teknik Ayunan dengan Porositas dan Penetrasi

Teknik ayunan elektroda memiliki pengaruh terhadap distribusi panas serta durasi logam cair berada dalam kondisi cair selama proses pengelasan. Ayunan yang terlalu lebar dapat menyebabkan distribusi panas menjadi tidak merata, sehingga proses pendinginan berlangsung tidak seragam dan meningkatkan kemungkinan terjebaknya gas di dalam logam las. Kondisi ini berpotensi menimbulkan cacat porositas (Hikbal and Nugroho, 2025)

Sebaliknya, teknik tanpa ayunan atau *stringer bead* menghasilkan konsentrasi panas yang lebih terfokus, sehingga mampu menghasilkan penetrasi yang lebih dalam. Namun, teknik ini cenderung menghasilkan manik las yang lebih sempit. Oleh karena itu, diperlukan penelitian untuk menentukan teknik ayunan elektroda yang paling optimal, sehingga dapat menghasilkan kombinasi terbaik antara penetrasi yang maksimal dan tingkat porositas yang minimal.

2.12 Kerangka Pemikiran

Dalam penelitian ini, teknik ayunan elektroda sebagai variabel bebas diperkirakan memengaruhi beberapa parameter proses, yaitu distribusi panas, waktu pembekuan logam cair, serta kestabilan busur listrik. Parameter-parameter tersebut selanjutnya akan berdampak pada kualitas hasil pengelasan, khususnya terhadap tingkat porositas dan kedalaman penetrasi.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi teknik ayunan elektroda yang paling optimal dalam menghasilkan kualitas sambungan las terbaik pada baja AISI 5160 dengan posisi pengelasan 1G.